



УДК 621.74

Поступила 02.09.2013

Н. В. СЛЕТОВА, СРО РАЛ, И. Н. ВОЛЬНОВ, МГИУ, С. П. ЗАДРУЦКИЙ, БНТУ,
В. А. ЧАЙКИН, филиал МГОУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ FLOW-3D®

Показано, что перспективными, с точки зрения экологической безопасности, материалами для изготовления рафинирующих препаратов для силуминов являются карбонаты кальция и стронция. Принципиальная возможность использования дисперсных карбонатов в рафинирующих смесях подтверждает моделирование процесса удаления неметаллических включений в алюминиевых сплавах с использованием программы FLOW-3D. Высокая эффективность рафинирующей смеси с модифицирующим эффектом подтверждается промышленными испытаниями.

The perspective materials for making fining preparations for the silumins are the calcium and strontium carbonates from the environmental safety point of view are shown. Principle possibility of using dispersed carbonates in the fining mixtures is confirmed by late inoculation process research using simulation FLOW-3D. The high efficiency of the fining mixture with the inoculants effect is confirmed by the industrial tests.

Известно, что наибольшее негативное влияние на свойства отливок из алюминиевых сплавов оказывают присутствующие в нем пленообразные включения оксида алюминия и водород, поэтому расплав перед разливкой подлежит обязательному рафинированию. В промышленных условиях наиболее технологичным и эффективным методом рафинирования алюминиевых сплавов является обработка расплава специальными солевыми композициями на основе хлор- и фторсодержащих соединений, что сопровождается выделением токсичных веществ, ухудшающих экологическую обстановку в цехе и отрицательно влияющих на здоровье работающего персонала.

В качестве классического модификатора на постсоветском пространстве используют натрий. Для ввода Na в расплав традиционно применяют его фторид, что сопровождается выделением токсичных фтористых соединений.

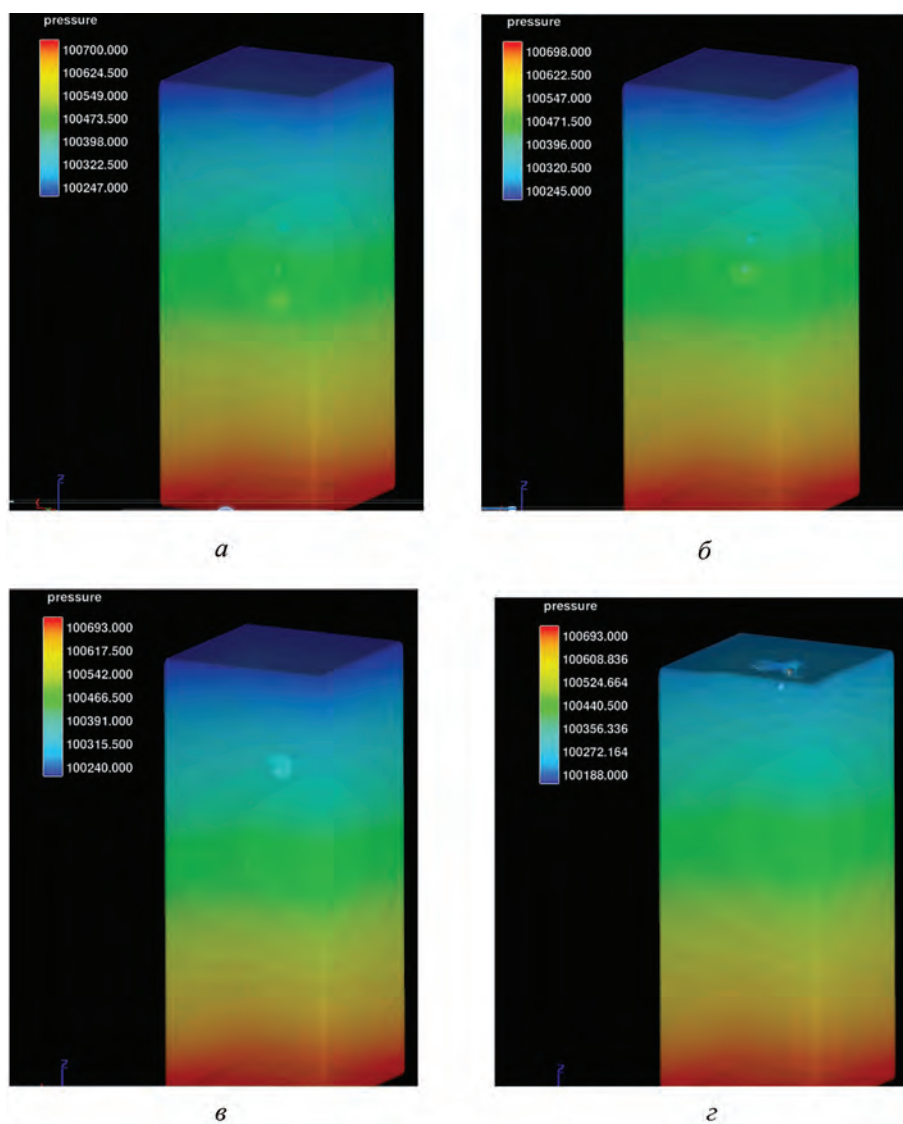
Исходя из сказанного выше, разработка экологически безвредных, высокоэффективных, не требующих использования дорогостоящего оборудования материалов для проведения рафинирующей и модифицирующей обработок расплавов на основе алюминия и технологий их применения весьма актуальна. Наиболее перспективными для решения этих задач служат карбонаты кальция и стронция.

Термодинамическое моделирование вероятных химических и фазовых превращений в системах

$\text{CaCO}_3\text{-Al}$ и $\text{SrCO}_3\text{-Al-Si}$ в температурном диапазоне 943–1173 К при глубине погружения карбонатов в расплав до 1 м с помощью программного комплекса HSC CHEMISTRY позволило установить возможность протекания газотворных реакций $3\text{CaCO}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CO}$ и $2\text{SrCO}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{Sr} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CO} + \text{CO}_2$ [1, 2]. В результате реакций создаются потоки рафинирующего газа CO. Для подтверждения рафинирующей способности образующегося газа в программном комплексе FLOW-3D® – гидродинамическом пакете общего назначения произвели моделирование процесса удаления оксидов алюминия с помощью всплывающих в металлическом расплаве пузырьков газа.

Главная цель моделирования – расчет всплытия пузырьков газа в металлическом расплаве, захват ими включений, которые в этом расплаве присутствуют, и выведение их на поверхность.

В качестве расплава использовали сплав АК12оч с плотностью $\rho_p = 6450 \text{ кг/м}^3$ и температурой $T_{\text{сплава}} = 720 \text{ }^\circ\text{C}$. Для сокращения затрат машинного времени была рассмотрена следующая модельная ситуация. Столб расплава высотой 50 мм и поперечным сечением 20×20 мм с газовой «шапкой» над ним высотой 10 мм (с тем же поперечным сечением). На высоте от основания столба 10 мм на его оси располагали газовый пузырек диаметром 2,4 мм и внутренним давлением 0,145 МПа



Результаты моделирования рафинирования сплава алюминия: *a* – газовый пузырек в начале пути; *б* – ассимиляция первой частицы; *в* – ассимиляция второй частицы; *г* – вынос частиц на поверхность сплава

(рисунок, *a*). Диаметр пузырька определяли расчетным путем. На пути всплытия пузырька, т. е. на оси столба расплава на высотах 30 и 35 мм от основания столба, размещали две частицы включения диаметром 1,6 мм. Размер включений приближен к максимальному, что усложняет эвакуацию их из расплава. Перечисленных данных достаточно для описания закономерностей поведения частиц оксидов алюминия в масштабе ковша.

Моделирование процесса проводили в программном комплексе *FLOW-3D*[®] – гидродинамическом пакете общего назначения, который успешно используется для решения различных литейных и металлургических задач. В терминах *FLOW-3D*[®] задачу моделировали в постановке двух жидкостей (металлический расплав и газовая среда) с поверхностью раздела между ними и учетом поверхностного натяжения. При этом расплав считался жид-

костью несжимаемой, а газовая среда, которой моделировали газовую «шапку» и газовый пузырек, считалась жидкостью сжимаемой. Поведение частиц включения в расплаве описывали моделью GMO (General Moving Object–свободного движения твердого тела в потоке) [3], а поверхность раздела расплав – газовая фаза рассчитывали с помощью VOF (volume-of-fluid) метода [4, 5], так как главная цель моделирования не связана с теплопереносом, этой частью реального процесса в моделировании пренебрегали.

Математическую модель процесса составляют следующие уравнения:

течение жидкостей: металлического расплава и газовой среды, описывается системой гидродинамических уравнений Навье–Стокса;

уравнения неразрывности в приближении вязкой жидкости: сжимаемой для газовой фазы и несжимаемой для расплава:

$$\begin{aligned} \rho_i \frac{du_i}{dt} &= -\frac{\partial P_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_i \left(2 \frac{\partial u_i}{\partial x} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \omega \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial y} + \frac{\partial v_i}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_i \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) \right], \\ \rho_i \frac{dv_i}{dt} &= -\frac{\partial P_i}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_i \left(2 \frac{\partial v_i}{\partial y} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \omega \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_i \left(\frac{\partial v_i}{\partial z} + \frac{\partial \omega_i}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial y} + \frac{\partial v_i}{\partial x} \right) \right], \\ \rho_i \frac{d\omega_i}{dt} &= -\frac{\partial P_i}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_i \left(2 \frac{\partial \omega_i}{\partial z} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \omega \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_i \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_i \left(\frac{\partial v_i}{\partial z} + \frac{\partial \omega_i}{\partial y} \right) \right] + g\rho_i, \\ \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i u_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_i v_i)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_i \omega_i)}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где u, v, ω – компоненты вектора скорости; ρ, μ – соответственно плотность и коэффициент динамической вязкости расплава; P – давление; t – время; g – вектор гравитации; i – индекс, принимающий значения « p » – расплав и « g » – газ. В уравнениях (1) для несжимаемого расплава принимается $\rho = \text{const}$.

Система уравнений (1) дополняется следующими начальными и граничными условиями.

1. Давление в газовой «шапке» и расплаве в начальный момент времени равно атмосферному. Начальное давление в газовом пузырьке 0,145 МПа.

2. На внешних сторонах расчетной области – гранях столба расплава с газовой «шапкой» задано условие симметрии.

3. На границах раздела расплав – газовая фаза учитывается поверхностное натяжение в соответствии с формулой Лапласа:

$$p_p = p_r + \sigma(1/r_1 + 1/r_2),$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения; r_1 и r_2 – ортогональные радиусы главных кривизн свободной поверхности.

4. На границах контакта расплава с частицами принимается условие «прилипания», т. е. скорость расплава на твердых стенках частиц равна скорости движения этих частиц.

Результаты моделирования (см. рисунок) показали, что пузырек рафинирующего газа, всплывая, сталкивается с первой и второй частицами оксида алюминия. На неметаллические включения, соприкасающиеся с поверхностью пузырька газа, действуют силы поверхностного натяжения, удерживают их при всплытии и увлекают частицы оксидов за собой (см. рисунок б, в), выводя их на поверхность расплава, где сам пузырек исчезает, переходя в газовую фазу (см. рисунок г).

Таким образом, моделированием в программном комплексе *FLOW-3D* подтверждена рафинирующая способность образующегося в системах $\text{CaCO}_3\text{-Al}$ и $\text{SrCO}_3\text{-Al-Si}$ газа.

Литература

1. Слетова Н. В., Чайкин В. А., Задрецкий С. П. и др. Термодинамическое моделирование химических реакций карбоната кальция в расплаве алюминия // *Литейщик России*. 2013. № 4.
2. Слетова Н. В., Чайкин В. А., Задрецкий С. П. и др. Термодинамическое моделирование химических реакций карбоната стронция в расплаве алюминия // *Литье и металлургия*. 2012. № 3. С. 85–88.
3. Бархударов М., Вей Г. Моделирование литейных процессов с изменяемой геометрией // *Литейщик России*. 2007. № 12. С. 10–15.
4. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries // *J. Computational Physics*. 1981. Vol. 39. P. 201–225.
5. Вольнов И. Н., Нагорный В. С. Моделирование процессов получения монодисперсных капель жидкостей в электрокапельструйных технологиях // *Науч.-техн. вед. СПб ГПУ. Наука и образование*. 2010. № 4. С. 294–300.